

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

22.12.2004



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 103 58 698.9

**Anmeldetag:** 15. Dezember 2003

**Anmelder/Inhaber:** Siemens Aktiengesellschaft, 80333 München/DE

**Bezeichnung:** Verfahren zur Regelung der Pumpleistung  
eines optischen Verstärkers

**IPC:** H 04 B, H 04 J

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 20. Dezember 2004  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

Stremme

## Beschreibung

Verfahren zur Regelung der Pumpleistung eines optischen Verstärkers

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Regelung der Pumpleistung eines optischen Verstärkers nach dem Oberbegriff des Patentanspruches 1.

10

Die Wellenlängenmultiplextechnik (WDM-Technik) bietet die Möglichkeit, an unterschiedlichen Orten befindliche Sender und Empfänger direkt über optische Pfade eines Netzwerks zu verbinden, ohne dass an Knotenstellen eine elektro-optische Wandlung erforderlich ist. In Zukunft wird es auch möglich

15

sein, optische Pfade mit Hilfe optischer Schaltmatrizen beliebig auf- und abzubauen. Dies ermöglicht im Vergleich zum jetzigen Stand der Technik deutliche Kostenersparnisse ohne Abstriche bei der Flexibilität der Verbindungen machen zu müssen.

20

Durch das Ab- und Zuschalten von übertragenen Signalen in Kanälen eines Multiplex-Übertragungssystems treten allerdings starke Leistungsschwankungen auf den einzelnen Teilstrecken auf. Um Bitfehler am Ende der Strecke zu vermeiden, darf sich

25

der Verstärkergegninn für die weiterhin übertragenen oder hinzugeschalteten Kanäle nicht ändern. Fig. 1 zeigt den mittleren Gewinn  $G$  aller Kanäle über der Zeit  $t$  für eine einzelne Verstärkerstufe und für zwei verschiedene Fälle, wobei angenommen wurde, dass zum Zeitpunkt Null die Eingangsleistung

30

durch Abschalten von Kanälen um 19dB abnimmt.

Hält man die Pumpleistung konstant (siehe die durchgezogene Kurve), so steigt der Gewinn  $G$  von 20dB vor dem Abschaltvorgang auf einen konstanten Wert von 30dB nach dem Abschaltvorgang an. Eine weitere hier gestrichelte Kurve zeigt zur Illustration den zeitlichen Verlauf des Gewinnes bei Verwendung eines einfachen Integralreglers, der dafür sorgt, dass der

35

mittlere Gewinn nach einem Einschwingvorgang mit einer Dauer von über 20ms wieder 20dB beträgt. Die gezeigten Über- und Unterschwinger können durch komplexere Regelungen deutlich reduziert werden, lassen sich aber nicht vollständig eliminieren. In einer Kaskade von Verstärkern kann es somit zu einer Akkumulation von Leistungsschwankungen und damit zu Bitfehlern oder gar zu einer Zerstörung der Empfangsdioden kommen.

Über- und Unterschwinger lassen sich nahezu vollständig eliminieren, wenn diejenige Pumpleistung, die nach Änderung des Eingangssignals zum Aufrechterhalten des Gewinns unter stabilen Bedingungen erforderlich ist, bereits zum Zeitpunkt der Laständerung am Eingang bekannt ist. Die eigentliche Schwierigkeit besteht darin, diese Pumpleistung mit möglichst hoher Genauigkeit vorauszuberechnen.

Eine einfachste Lösung hierfür sieht vor, einen linearen Ansatz für die erforderliche Pumpleistung als Funktion der Signaleingangsleistung am optischen Verstärker zu wählen. Dieser Aspekt wird in US 6414788 B1 und US 6341034 B1 beschrieben. Dabei kommen zwei konstante Parameter zum Einsatz. Bei diesem Vorgehen werden jedoch folgende wesentliche Einflussgrößen nicht berücksichtigt:

- Die benötigte Pumpleistung hängt nicht nur von der Eingangsleistung, sondern auch von dem Gewinn der jeweiligen Verstärkerstufe ab. Da die Stufe eines Verstärkers je nach Einsatz und Kanalbelegung deutlich unterschiedliche Gewinnwerte aufweisen kann, ergeben sich deutliche Abweichungen, die eine Ermittlung der korrekten einzustellenden Pumpleistung beeinträchtigen.
- Es wird nicht berücksichtigt, dass die benötigte Pumpleistung von der Wellenlänge der bei einer Abschaltung überlebenden Kanäle abhängt. Dies gilt ebenso für sogenannte "Gain Ripple".

- "Fitting Parameter" zur Bestimmung von einzustellenden Pumpleistungswerten werden zu Betriebsbeginn bestimmt, so dass Alterungseffekte mit zunehmender Betriebsdauer zu ansteigenden Abweichungen führen.
  - Nichtlineare Effekte in einer Verstärkungsfasern eines Faserverstärkers, wie z. B. "Excited State Absorption" in einer mit Erbium dotierten Faser eines EDFAs (erbium doped fiber amplifizier), bleiben unberücksichtigt und führen damit zu zusätzlichen Abweichungen.
- Zur Berücksichtigung der spektralen Abhängigkeit wird in US 6341034 B1 der Einbau eines spektralen Filters vor einem Eingangsmontor am optischen Verstärker vorgeschlagen. Damit kann die Wellenlängenabhängigkeit des Verfahrens verbessert, wenn auch nicht vollständig eliminiert werden. Aufgrund der hohen Komponentenkosten ist ein Einsatz dieses Verfahrens jedoch unwahrscheinlich.
- In "Superior high-speed automatic gain controlled erbium-doped fiber amplifizier", Nakaji H., Nakai Y., Shigematsu M und Nishimura M., Optical Fiber Technology 9 (2003), pp. 25-35 wird eine Methode zur Unterdrückung von zeitlichen Gewinn-schwankungen in einem überlebenden Kanals eines WDM-Signals bei der Ein- oder Abschaltung weiterer Kanäle des WDM-Signals beschrieben. Zur Verstärkung des WDM-Signals kommt ein EDFA zum Einsatz, der mit einer Pumpquelle bei 980 nm oder mit einer Pumpquelle bei 1480 nm arbeitet. Bei Verwendung eines Pumpasers im Wellenlängenbereich von 1480nm und einer optimalen Einstellung der Regelparameter für einen speziellen Anwendungsfall können Überschwinger beim Abschalten von Kanälen nahezu vollständig vermieden werden. Hingegen kommt es bei Verwendung eines Pumpasers im Wellenlängenbereich von 980nm nach einer Abschaltung von Kanälen zu einem geringen Überschwinger. Wird nun die Pumpleistung nicht wie oben angenommen zum Zeitpunkt des Schaltvorgangs sondern bereits etwas

- früher auf einen neuen Wert reduziert bzw. angepasst, z. B. mittels eines dem Verstärker vorgeschalteten Verzögerungsgliedes, lässt sich der Überschwinger bei Verwendung der Pumpquelle bei 980 nm fast vollständig eliminieren. Dieses
- 5 Verfahren basiert darauf, dass die Abnahme der Ausgangsleistung (Wirkung) später als die Abnahme der Eingangsleistung (Ursache) detektiert wird, so dass der Gewinnregelung für einen Zeitraum entsprechend der Verzögerung ein starker Anstieg des Gewinns vorgetäuscht wird, worauf diese mit einer Reduktion der Pumpleistung reagiert. Experimentelle Gewinnmessungen können aus dieser Literaturstelle nachgewiesen werden. Allerdings entsteht immer noch ein Unterschwinger sehr kurzer Zeitdauer.
- 10
- 15 Dieses Verfahren, das im folgenden als "Feedback-Methode" bezeichnet wird, ist sehr gut geeignet für Laborexperimente, kann jedoch kaum für kommerzielle Systeme eingesetzt werden, da die optimale Zeitverzögerung von der Anzahl der überlebenden Kanäle abhängig ist, keine Vorschrift zur Vorherbestimmung dieser optimalen Verzögerung bekannt ist und die Regelparameter nur für ein spezielles Ereignis optimiert sind. In der Praxis müssen beliebige Ereignisse, d. h. z. B. der Drop (Abzweigen/Wegschalten/Abschalten) einer unterschiedlichen Anzahl von Kanälen, berücksichtigt werden. Dafür sollte die
- 20
- 25 Zeitverzögerung immer neu berechnet und eingestellt werden, was aber in Echtzeit unmöglich bzw. unrealisierbar wäre. Daher erfährt der wellenlängenabhängige Gewinnverlauf unvermeidlich Abweichungen bei einem oder mehreren überlebenden Kanälen, die die breitbandige Verstärkung, zusätzlich zu den
- 30 bekannten zeitlichen Schwankungen des kanalbezogenen Gewinns, beeinträchtigen. Aus diesen Gründen eignet sich diese Methode für aktuelle optische Schaltnetze nicht.
- 35 Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren anzugeben, das eine optimale Regelung der Pumpleistung eines optischen Verstärkers zur Verstärkung eines optischen Multiplex-Signals

mit mehreren Kanälen gewährleistet, damit bei Änderung der Eingangs- oder Eingangsleistung am optischen Verstärker der wellenlängenabhängige Gewinnverlauf für zu verstärkende Signale aktiver Kanäle aufrechterhalten wird.

5

Eine Lösung der Aufgabe erfolgt durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1.

10 Ausgehend von einem stabilen Zustand, der z. B. mittels einer Regelung eingestellt wurde, insbesondere der entsprechenden Pumpleistung eines optischen Verstärkers, mit dem ein optisches Wellenlängen-Multiplex-Signal mit mehreren Kanälen verstärkt wird und bei dem eine Änderung der Eingangsleistung oder Ausgangsleistung des Wellenlängen-Multiplex-Signals de-

15 tektiert wird, wird erfindungsgemäß nach der Änderung der Eingangsleistung ein neuer Wert der gemessenen Pumpleistung derart berechnet und eingestellt, dass sich der Gewinnverlauf des Verstärkers nur minimal ändert.

20 Die neu einzustellende Pumpleistung kann kurz nach Ab- oder Einschaltung von aktiven Kanälen errechnet und noch rechtzeitig eingestellt werden, da der Gewinn eines EDFAs als Funktion der Wellenlänge in einem kurzen Zeitintervall quasi-konstant bleibt.

25

Ein wesentlicher Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens ist darin zu sehen, dass viele wesentliche Einflussgrößen, wie der aktuelle Gewinnwert, die Wellenlängenabhängigkeit aktiver Kanäle, Alterungseffekte und nicht-lineare Effekte der Ver-

30 stärkung, bei der Berechnung der neuen einzustellenden Pumpleistung berücksichtigt werden, so dass eine hoch genaue Ermittlung der optimalen Pumpleistung rasch erfolgt und damit störende Transienten, d. h. Amplitude und Dauer von Überschwüngen, effektiv unterdrückt werden.

35

In vorteilhafter Weise können neue Pumpleistungen z. B. kontinuierlich errechnet und eingestellt werden, sowie auch im Voraus berechnet und eingestellt werden. In solchen Fällen können weiterhin Interpolationswerte aus den vorberechneten  
5 Pumpleistungen ermittelt werden.

Durch Messung der Ausgangsleistung, kurz nachdem der Sprung detektiert wurde, kann die Wellenlängenabhängigkeit vollständig berücksichtigt werden. Alterungseffekte werden kompensiert, da eine Vorausberechnung der Pumpleistung relativ zu dem zuvor vorliegenden stabilen Zustand der Verstärkung erfolgt. Ebenso geht der momentane Verstärkergegninn in die Berechnung ein und nichtlineare Effekte in der verstärkenden Faser, wie z. B. bei "Excited State Absorption", werden berücksichtigt. Auch "Gain Ripple" führen zu keiner Veränderung des Gewinns der einzelnen Kanäle. Von besonderer Bedeutung ist, dass dieses Verfahren, neben den bereits im Stand der Technik verwendeten, keine zusätzlichen Messeinrichtungen oder Komponenten benötigt und damit auch aus Kostensicht sehr  
10  
15  
20 interessant ist.

In der folgenden Beschreibung wird das erfindungsgemäße Verfahren hauptsächlich für eine Verstärkerstufe illustriert, die eine mit Erbium dotierte Faser enthält. Das Verfahren  
25 kann jedoch auch für mehrere kaskadierte Verstärkerstufen mit eventuell unterschiedlichen Verstärkungsfasern und/oder Pumpquellen verwendet werden. Ein Ausführungsbeispiel für den Einsatz mehrerer Pumpquellen in einer Verstärkerstufe wird sogar ausdrücklich beschrieben.

30 Von Vorteil bei der vorliegenden Erfindung ist ein Modell, das aus einem zuvor vorliegenden stabilen Zustand des optischen Verstärkers die Ermittlung bzw. die Errechnung einer neu erforderlichen Pumpleistung ermöglicht. Dazu werden ebenfalls  
35 weitere begrenzte Aspekte betrachtet und deren Einflüsse auf das Modell analysiert.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unter-  
ansprüchen angegeben.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird im folgenden an-  
5 hand der Zeichnung näher erläutert.

Dabei zeigen:

- Fig. 2: den zeitlichen Gewinnverlauf bei Abschaltung von  
aktiven Kanälen,
- 10 Fig. 3: das Gewinnspektrum eines EDFAs bei 80 aktiven Kanä-  
len,
- Fig. 4: den zeitlichen Gewinnverlauf eines überlebenden Ka-  
nals,
- Fig. 5: zeitliche Gewinnabweichungen für die Kanäle inner-  
15 halb 10 ms nach Abschaltzeit,
- Fig. 6: zeitliche Gewinnabweichungen für die Kanäle inner-  
halb 25  $\mu$ s nach Abschaltzeit,
- Fig. 7: die soll- und modellbezogene einzustellende Pump-  
leistung als Funktion der Eingangleistung,
- 20 Fig. 8: Abweichungen zwischen soll- und modellbezogenen  
einzustellenden Pumpleistungswerten,
- Fig. 9: ein dynamisches Regelkonzept,
- Fig. 10: zeitliche Gewinnverläufe des überlebenden Kanals  
bei unterschiedlichen Abschaltdauern der anderen  
25 Kanäle
- (a) Abschaltdauer: 1  $\mu$ s
- (b) Abschaltdauer: 10  $\mu$ s
- (c) Abschaltdauer: 100  $\mu$ s
- (d) Abschaltdauer: 1 ms
- 30 (e) Abschaltdauer: 10 ns bis 1 ms
- Fig. 11: die Amplitude des Überschingers bei unterschiedli-  
chen Abschaltdauern von Kanälen,
- Fig. 12: die geregelte Leistungsverteilung eines drei-  
stufigen Faserverstärkers.

35

In Fig. 2 ist ein zeitlicher Gewinnverlauf G bei Abschaltung  
von aktiven Kanälen in einem einstufigen Erbium dotierten Fa-



serverstärker dargestellt, wobei die bei der reduzierten Eingangsleistung zur Aufrechterhaltung des Gewinns erforderliche Pumpleistung zum Zeitpunkt der Laständerung eingestellt wird. Ein Unterschwinger ist dabei komplett unterdrückt.

5

Im folgenden wird unter weiterer Bezugnahme auf die Funktionseinheiten der Fig. 2 näher erläutert, wie, ausgehend von einem bekannten Betriebszustand, die nach dem Schaltvorgang zur Aufrechterhaltung des Gewinns erforderliche Pumpleistung  $P_{\text{pump}}^{\text{nach}}$  berechnet werden kann. Sämtliche Leistungsangaben beziehen sich dabei im folgenden auf den Anfang bzw. das Ende der mit Erbium dotierten Faser. Die mit Hilfe von Photodioden gemessenen Leistungen beziehen sich jedoch in der Regel auf den Eingang der mit Erbium dotierten Faser. In diesem Fall ist noch eine Korrektur der Leistungsangaben um die eingangs- und ausgangsseitigen Dämpfungsverluste der vor- und nachgeschalteten Komponenten erforderlich.

15

Im Rahmen der Produktion sei der EDFA vermessen und zwei Kalibrationsparameter  $G_{\text{norm}}$  und  $P_0$  bestimmt worden. Ausgehend von der Pumpleistung  $P_{\text{pump}}^{\text{vor}}$  vor dem Schaltvorgang wird eine effektive Pumpleistung  $P_{\text{eff}}^{\text{vor}}$ :

20

$$P_{\text{eff}}^{\text{vor}} = P_0 \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{P_{\text{pump}}^{\text{vor}}}{P_0} \right\} \quad (1)$$

25

berechnet. Mit der Summensignalleistung  $P_{\text{signal}}^{\text{vor}}$  vor dem Schaltvorgang ergibt sich der Wert der effektiven Pumpleistung für die Signalleistung  $P_{\text{signal}}^{\text{nach}}$  nach dem Schaltvorgang zu

$$P_{\text{eff}}^{\text{nach}} = P_{\text{eff}}^{\text{vor}} + \frac{\bar{\lambda}_{\text{signal}}}{\lambda_{\text{pump}}} \cdot \frac{1}{G_{\text{norm}}} \cdot \{ P_{\text{sig,out}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}} + P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}} \} \quad (2)$$

30

wobei die dabei auftretenden Formelzeichen die folgende Bedeutung haben:

$P_{sig,out}^{nach}$  die sich nach dem Schaltvorgang bei gleichbleibendem Gewinn (d. h. stabilem Zustand) ergebende Summenausgangsleistung,

5  $P_{sig,in}^{nach}$  die Summeneingangsleistung nach dem Schaltvorgang,

$P_{sig,out}^{vor}$  die Summenausgangsleistung vor dem Schaltvorgang,

$P_{sig,in}^{vor}$  die Summeneingangsleistung vor dem Schaltvorgang,

10

Die beiden Wellenlängen  $\bar{\lambda}_{signal}$  und  $\lambda_{pump}$  stehen für die mittlere Signalwellenlänge nach dem Schaltvorgang bzw. die Pumpwellenlänge. In der Regel wird die genaue Kanalbelegung nach dem Schaltvorgang erst mit deutlicher Verzögerung bekannt sein und steht damit für die Regelung nicht zur Verfügung. In diesem Fall kann für die mittlere Signalwellenlänge die mittlere Wellenlänge der Signale bei voller Belegung des Verstärkungsbandes angesetzt werden. Die nach dem Schaltvorgang einzustellende Pumpleistung  $P_{pump}^{nach}$  ergibt sich damit zu

20

$$P_{pump}^{nach} = P_0 \cdot \left[ \exp \left\{ \frac{P_{eff}^{nach}}{P_0} \right\} - 1 \right]. \quad (3)$$

Alle oben verwendeten Größen sind im linearen Maßstab zu verwenden.

25

Zur Berechnung der Pumpleistung  $P_{pump}^{nach}$  nach dem Schaltvorgang müssen die Summenleistungen eingangs- und ausgangsseitig sowohl vor als auch nach dem Schaltvorgang bekannt sein. Aufgrund der geforderten Regelzeiten müssen sowohl die Messeinrichtungen am Eingang der Verstärkerstufe als auch diejenige am Ausgang kurze Messzeiten aufweisen. Die Forderung nach kurzen Messzeiten kann allerdings auf den Zeitpunkt nach dem Schaltvorgang eingeschränkt werden, da angenommen wird, dass der Schaltvorgang ausgehend von einem stabilen Zustand erfolgt.

35

Einzelne Verstärkerstufen weisen typischerweise einen Gewinn von 20dB oder mehr auf. Dies bedeutet, dass die Ausgangsleistungen um ca. zwei Größenordnungen größer sind als die Eingangsleistungen. Beim Abschalten von Kanälen ist daher der  
 5 zweite Term in der geschweiften Klammer von Gleichung (2) vernachlässigbar und die Gleichung kann zu

$$P_{\text{eff}}^{\text{nach}} \approx P_{\text{eff}}^{\text{vor}} + \frac{\bar{\lambda}_{\text{signal}}}{\lambda_{\text{pump}}} \cdot \frac{1}{G_{\text{norm}}} \cdot \{P_{\text{sig,out}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}} + P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}}\} \quad (4)$$

10 vereinfacht werden.

Ein wesentliches Problem stellt aber noch die Berechnung der sich nach dem Schaltvorgang bei gleichbleibendem Gewinnverlauf ergebenden Ausgangsleistung dar. Wenn sich der mittlere  
 15 Gewinn nicht ändert, kann Gleichung (2) in

$$P_{\text{eff}}^{\text{nach}} = P_{\text{eff}}^{\text{vor}} + \frac{\bar{\lambda}_{\text{signal}}}{\lambda_{\text{pump}}} \cdot \frac{G_{\text{sig}} - 1}{G_{\text{norm}}} \cdot \{P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}}\} \quad (5)$$

mit 
$$G_{\text{sig}} = \frac{P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}}}{P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}}}$$

20

umgeformt werden. In der Regel ist jedoch der Gewinn einer Verstärkerstufe eines EDFAs, insbesondere wenn sie kein Glättungsfilter enthält, für die einzelnen Kanäle unterschiedlich.

25

Bei Verwendung mehrerer Pumpquellen im optischen Verstärker ist das prinzipielle Vorgehen identisch zu dem Vorgehen bei nur einer Pumpquelle. Zunächst werden die im Referenzzustand vorliegenden Pumpleistungen separat entsprechend der Gleichung (1) in effektive Pumpleistungen umgerechnet, wobei unter Umständen für die einzelnen Pumpquellen unterschiedliche Parameter  $P_0$  verwendet werden müssen. Die effektiven Pumpleistungen  $P_{\text{eff},i}^{\text{vor}}$  werden dann anschließend mit dem Quotienten aus der mittleren Signalwellenlänge  $\bar{\lambda}_{\text{signal}}$  und der jeweiligen

Pumpwellenlänge  $\lambda_{\text{pump}}^i$  gewichtet. Die Summe dieser Größen ergibt eine Hilfsgröße  $X_{\text{eff}}^{\text{vor}}$ :

$$X_{\text{eff}}^{\text{vor}} = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_{\text{pump}}^i}{\bar{\lambda}_{\text{signal}}} \cdot P_{\text{eff},i}^{\text{vor}}$$

5

wobei N die Anzahl der Pumpquellen bezeichnet. Die nach dem Schaltvorgang einzustellende Hilfsgröße  $X_{\text{eff}}^{\text{nach}}$  ergibt sich entsprechend zu:

$$10 \quad X_{\text{eff}}^{\text{nach}} = X_{\text{eff}}^{\text{vor}} + \frac{1}{G_{\text{norm}}} \cdot \{P_{\text{sig,out}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}} + P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}}\}.$$

Für die Aufrechterhaltung des Gewinns ist es ohne Belang, wie stark die einzelnen Pumpquellen zu diesem Sollwert beitragen. Dennoch kann es Präferenzen geben, die z. B. aus der Forderung nach einer möglichst optimalen Rauschzahl resultieren und von der gewählten Pumpkonfiguration abhängen.

15

Sind die Beiträge der einzelnen Pumpquellen festgelegt, werden diese mit dem Quotienten aus der mittleren Signalwellenlänge  $\bar{\lambda}_{\text{signal}}$  und der entsprechenden Pumpwellenlänge  $\lambda_{\text{pump}}^i$  mul-

20

tipliziert. Damit liegen nun wieder die jeweiligen effektiven Pumpleistungen vor, die nach Gleichung (3) in die tatsächlichen Pumpleistungen  $P_{\text{pump}}^{\text{nach}}(i)$  umgerechnet werden.

25

Das zuvor beschriebene Vorgehen beruht auf der quasi immer erfüllten Annahme, dass die an einer Stelle der Verstärkerfaser eingekoppelten Pumpleistungen jeweils Wellenlängen aus unterschiedlichen Absorptionsbändern aufweisen.

30

Die **Fig. 3** zeigt ein Beispiel für den Verlauf des Gewinns G als Funktion der Wellenlänge  $\lambda$  für 80 Kanäle eines WDM-Signals.

35

Exemplarisch wird nun der Fall betrachtet, dass alle Kanäle bis auf den markierten überlebenden Kanal UK abgeschaltet werden. Das eigentliche Ziel der Regelung ist es nicht, den mittleren Gewinn, wie er aus einer Gesamtleistungsmessung am

Eingang und am Ausgang der Stufe resultiert, konstant zu halten. Vielmehr muss dafür gesorgt werden, dass sich der Gewinnverlauf über der Wellenlänge nicht ändert, denn nur dann bleibt die Leistung, die auf die jeweiligen Empfänger fällt, über der Zeit unverändert. In dem obigen Beispiel bedingt dies eine Änderung des mittleren Gewinns.

Hilfreich bei der Bestimmung eines neuen Sollgewinns sind die dynamischen Eigenschaften einer Erbium-dotierten Faser. Selbst bei einer sprunghaften Änderung der Eingangsleistung ändert sich die mittlere Besetzungsinversion und damit das Gewinnprofil nur langsam. Die Fig. 4 zeigt einen zeitlichen Gewinnausschnitt der bereits in der Figur 1 gezeigten durchgezogene Kurve für eine konstant bleibende Pumpleistung bei einem Sprung der Eingangsleistung von 19 dB und z. B. für den überlebenden Kanal UK, der sich für große Zeitspannen asymptotisch einem Grenzwert von 30 dB nähert. Innerhalb der ersten 10  $\mu$ s nach dem Schaltvorgang ändert sich der Gewinn des betrachteten Kanals jedoch nur geringfügig. Daher kann diese Zeitspanne benutzt werden, um die gewünschte Ausgangsleistung nach dem Schaltvorgang und den entsprechenden mittleren Gewinn bei veränderter spektraler Leistungsverteilung zu bestimmen.

Für das oben vorgestellte Ausführungsbeispiel, bei dem von 80 Kanälen bis auf einen Kanal bei 1531.9 nm alle weiteren Kanäle abgeschaltet werden, ist das dynamische Verhalten des Faserverstärkers EDFAs in den weiteren Figuren 5 und 6 dargestellt. Gezeigt werden zeitliche kanalindividuelle Gewinnänderungen  $DG(t)$  bei verschiedenen Wellenlängen (im Bereich von 0 dB dargestellte Kurven) sowie die Änderung des mittleren Gewinns (dargestellte Kurve mit einem Sprung bei ca. 2 dB) in Bezug auf den Zustand vor dem Schaltvorgang an  $t=0$  ms. Die gestrichelt dargestellte horizontale Linie bei ca. 2 dB gibt die Gewinnänderung nach Erreichen des eingeschwungenen Zustands an. Figur 6 ist eine Zeitlupe der Figur 5 im Bereich

von einigen Millisekunden vor und nach dem Schaltvorgang von Kanälen.

5 Nun zeigt die folgende **Figur 7** eine durch durchgezogene Kurven KA, KB, KC, KD dargestellte erforderliche, d. h. Soll-Pumpleistung  $P_{PUMP}$  als Funktion der Eingangsleistung  $P_{IN}$  des Faserverstärkers, die zur Aufrechterhaltung verschiedener mittlerer Gewinnwerte 5, 10, 15, 20 dB nach einem Schaltvorgang gemäß **Figur 4** bis **6** eingestellt sein sollte. Zur Verifikation  
10 kation des oben beschriebenen Verfahrens wurde, jeweils ausgehend von dem Datenpunkt mit maximaler Eingangsleistung, die Pumpleistung nach obigem Verfahren gemäß den Gleichungen (1) bis (6) bestimmt und das jeweilige Ergebnis durch Punkte in der **Figur 7** dargestellt. Dabei fällt die sehr gute Übereinstimmung der per Simulation ermittelten Pumpleistungen mit  
15 den vorausberechneten Werten auf.

Zur Verdeutlichung zeigt die **Figur 8** gemäß den Kurven KA, KB, KC, KD und den eingetragenen Punkten aus **Figur 7** den relativen Fehler DEV zwischen der erfindungsgemäßen Vorausberechnung der Pumpleistung und der erforderlichen Soll-Pumpleistung. Dabei beträgt der relative Fehler maximal ca.  
20 5%.

25 Bisher wurde davon ausgegangen, dass die Eingangsleistung beim Abschalten von Kanälen sofort von einem Startwert auf einen Endwert abfällt. In dem folgenden Abschnitt wird nun das Vorgehen mit auftretenden Effekten auf dem restlichen Überschwinger des Gewinns für den Fall beschrieben, dass die  
30 Eingangsleistung während einer Abschaltzeit  $T_{fall}$  (siehe voraussichtlich **Figuren 10a** bis **10e** mit **Figur 11**) linear von ihrem Startwert auf den Endwert abfällt. Unter diesen Annahmen stellt die **Figur 9** ein dynamisches Regelkonzept zur Durchführung des Verfahrens dar.

35 Zunächst wird überprüft, ob die Eingangsleistung schon seit einer vorgegebenen Zeitspanne konstant war (Schritt 1). Ist dies der Fall, wird der Verstärker mit dem herkömmlichen Re-

gelkonzept mit Rückkopplung betrieben (Schritt 11) (siehe dazu z. B. Mann, Schiffelgen, Froriep, "Einführung in die Regelungstechnik", Hanser-Verlag, München, 7. Auflage, 1997).

Wird dabei ein stabiler Zustand erreicht (Schritt 12), wird  
 5 dieser als neuer Referenzzustand definiert (Schritt 13). Ist  
 hingegeben die Eingangsleistung nicht konstant, d. h. wird  
 eine Änderung der Eingangsleistung während der vorgegebenen  
 Zeitspanne detektiert (Schritt 1), wird auf den erfindungsge-  
 10 mäßigen Feedforward-Betrieb umgeschaltet (Schritt 21). Die ein-  
 zustellenden Pumpleistungen werden dabei nach jedem Zeitin-  
 tervall basierend auf dem letzten Referenzzustand und den ak-  
 tuellen Werten für die Eingangsleistung sowie die Ausgangs-  
 leistung berechnet (Schritt 22) und eingestellt (Schritt 23).  
 Anschließend wird nochmals wiederum geprüft, ob die Eingangs-  
 15 leistung schon seit einer vorgegebenen Zeitspanne konstant  
 war (Schritt 1).

Wie schon zuvor wird nun der Fall untersucht, dass ausgehend  
 von 80 Kanälen alle Kanäle bis auf einen bei 1531.9 nm abge-  
 20 schaltet werden. Zeitliche Gewinnverläufe des überlebenden  
 Kanals bei unterschiedlichen Abschaltzeiten bzw. -dauern von  
 1  $\mu$ s, 10  $\mu$ s, 100  $\mu$ s und 1 ms sind in den Figuren 10a, 10b,  
 10c und 10d mittels einer durchgezogenen Kurve dargestellt  
 sowie für Abschaltzeiten zwischen 10 ns und 1 ms in der Figur  
 25 10e einander überlagert, wobei der Zeitpunkt und der Wert der  
 maximalen Gewinnänderung  $G_{max}$  mit einem Punkt dargestellt  
 wird. Zum besseren Verständnis zeigt die gestrichelt dar-  
 stellte Kurve den zeitlichen Verlauf der abfallenden Ein-  
 gangsleistung im linearen Maßstab.

Wie die vorhergehenden Untersuchungen gezeigt haben, ergibt  
 sich bei einer sprunghaften Änderung der Eingangsleistung und  
 einer exakten Vorausberechnung der im stabilen Zustand benö-  
 30 tigten Pumpleistung ein geringfügiger Überschwinger. Prinzi-  
 piell bestünde die Möglichkeit, dass sich diese Fehler bei  
 35 einer wiederholten Anwendung der vorausschauenden Einstellung  
 der Pumpleistung unter Verwendung der aktuell gemessenen Aus-

gangsleistung akkumulieren und es zu einer Divergenz des Verfahrens kommt. Dies ist jedoch nicht der Fall.

5 In Figur 10e sind die sich für verschiedene Abschaltzeiten im Bereich von 10ns bis 1ms ergebenden Gewinnverläufe des "überlebenden" Kanals einander überlagert dargestellt, wobei wiederum die Punkte die jeweilige maximale Gewinnänderung  $G_{max}$  markieren. Bemerkenswerterweise hängt der Einschwingvorgang für große Zeitspannen nur geringfügig von der Abschaltzeit  
10 ab.

Ergänzend zu der Figur 10e zeigt die **Figur 11** den auftretenden Überschwinger  $DEV_{max}$  als Funktion der Abschaltzeit  $T_{fall}$  an. Bei Abschaltzeiten unterhalb 1µs ergibt sich ein konstanter Wert, während bei größeren Abschaltzeiten die Stärke des Überschwingers mit größer werdender Abschaltzeit immer mehr  
15 abnimmt.

Ferner zeigt die **Figur 12** die geregelte Leistungsverteilung  $OPT\_POW$  eines drei-stufigen Faserverstärkers, bestehend aus den Verstärkerstufen S1, S2 und S3, dessen Gewinn mit Hilfe eines den ersten Verstärkerstufen S1, S2 zwischengeschalteten variablen Dämpfungsgliedes att variiert werden kann. Zwischen  
20 die beiden letzten Stufen S2, S3 kann ein weiteres optisches Modul DCF eingefügt werden, das z. B. das Hinzuschalten und Auskoppeln von wellenlängenbezogenen Kanälen oder aber eine  
25 Kompensation der Streckendämpfung ermöglicht.

Dabei wird die Leistungsverteilung  $OPT\_POW$  entlang des gesamten Faserverstärkers für verschiedene Betriebszustände dargestellt. Die Leistungskurve  $POW1$  zeigt die vor dem Schaltvorgang herrschende Leistungsverteilung im Faserverstärker, die einen stabilen Zustand erreicht hat und für die eine vorliegende Kanalbelegung eine optimale Rauschzahl bietet. Um Über-  
30 und Unterschwinger zu vermeiden bzw. so gering wie möglich zu halten, werden die einzelnen Verstärkerstufen direkt nach dem Schaltvorgang mit Hilfe der Feedforward-Regelung auf konstan-



tem Gewinn gehalten, so dass sich direkt nach dem Schaltvorgang ein zweiter dargestellter Leistungsverlauf POW2 ergibt. Da dieser jedoch im Hinblick auf die Rauschzahl nicht optimal ist, sorgt eine langsame Regelung, nachdem das Eingangssignal stabil ist, dafür, dass der Leistungsverlauf langsam von dem zweiten Leistungsverlauf POW2 zu einem weiteren hier als gestrichelte Kurve POW3 dargestellten Leistungsverlauf übergeht. Dieser Vorgang geht langsam vonstatten, so dass diese Funktion mittels einer herkömmlichen Regelung durchgeführt werden kann.

Da sich der Gewinn der einzelnen Verstärkerstufen S1, S2, S3 in einem ersten Zeitintervall nicht verändern soll, können die sich nach dem Schaltvorgang am Eingang jeder Stufe einstellenden Summensignalleistungen unabhängig voneinander berechnet werden. Die dazu erforderlichen Pumpleistungen können direkt anhand der bereits dargelegten Formeln bestimmt werden.

Unter Umständen reicht die verfügbare Rechenleistung nicht aus, um nach dem Schaltvorgang in Echtzeit die neuen erforderlichen Pumpleistungen zu berechnen. In diesem Fall bietet es sich an, direkt nach Erreichen eines stabilen Zustandes prophylaktisch eine Tabelle anzulegen, die die zur Aufrechterhaltung des Gewinns erforderliche Pumpleistung für eine ausreichende Anzahl an Signaleingangsleistungen enthält, die bei Schaltvorgängen als Referenzwerte für eine Interpolation dienen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Anpassung einer Pumpleistung eines optischen Verstärkers, mit dem ein optisches Wellenlängen-Multiplex-  
5 Signal mit mehreren Kanälen verstärkt wird und bei dem eine Änderung von Eingangsleistung oder Ausgangsleistung detektiert wird,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass nach der Änderung der Eingangsleistung ein neuer Wert  
10 der gemessenen Pumpleistung derart berechnet und eingestellt wird, dass sich der Gewinn des Verstärkers als Funktion der Wellenlänge nur minimal ändert.
2. Verfahren nach Anspruch 1,  
15 durch gekennzeichnet,  
dass die neu einzustellende Pumpleistung ausgehend von einem zuvor herrschenden stabilen Zustand des Gewinns bestimmt wird.
- 20 3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass bei der Neueinstellung der Pumpleistung eine Wellenlängenabhängigkeit der optischen Verstärkung derart berücksichtigt wird, dass Leistungsänderungen der Kanäle am Ende einer  
25 Übertragungsstrecke minimal bleiben.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass der Zustand der optischen Verstärkung durch wenigstens  
30 drei von folgenden Parametern definiert wird: die Eingangsleistung, die Ausgangsleistung, den Gewinn und die Pumpleistung.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass die neue Pumpleistung gemäß einem Modell errechnet wird,  
das den aktuellen wellenlängenabhängigen Gewinnwert, Alterungseffekte und nicht-lineare Effekte der Verstärkung berücksichtigt.

6. Verfahren nach Anspruch 5,  
dadurch gekennzeichnet,  
10 dass das Modell zur Errechnung der neuen Pumpleistung  $P_{\text{pump}}^{\text{nach}}$  durch folgende Formeln definiert wird:

$$P_{\text{pump}}^{\text{nach}} = P_0 \cdot \left[ \exp \left\{ \frac{P_{\text{eff}}^{\text{nach}}}{P_0} \right\} - 1 \right] \text{ mit}$$

$$P_{\text{eff}}^{\text{nach}} = P_{\text{eff}}^{\text{vor}} + \frac{\bar{\lambda}_{\text{signal}}}{\lambda_{\text{pump}}} \cdot \frac{1}{G_{\text{norm}}} \cdot \{P_{\text{sig,out}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}} - P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}} + P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}}\} \text{ und}$$

$$15 \quad P_{\text{eff}}^{\text{vor}} = P_0 \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{P_{\text{pump}}^{\text{vor}}}{P_0} \right\}$$

wobei ( $P_{\text{sig,out}}^{\text{nach}}$ ) die sich nach dem Schaltvorgang bei unverändertem Gewinnverlauf ergebende Summenausgangsleistung,  
( $P_{\text{sig,in}}^{\text{nach}}$ ) die Summeneingangsleistung nach dem Schaltvorgang,  
20 ( $P_{\text{sig,out}}^{\text{vor}}$ ) die Summenausgangsleistung vor dem Schaltvorgang,  
( $P_{\text{sig,in}}^{\text{vor}}$ ) die Summeneingangsleistung vor dem Schaltvorgang,  
( $\bar{\lambda}_{\text{signal}}$ ) und ( $\lambda_{\text{pump}}$ ) die mittlere Signalwellenlänge nach dem Schaltvorgang bzw. die Pumpwellenlänge, ( $G_{\text{norm}}$ ,  $P_0$ ) zwei Kalibrationsparameter des optischen Verstärkers und ( $P_{\text{pump}}^{\text{vor}}$ ) die  
25 gemessene Pumpleistung vor dem Schaltvorgang bezeichnen.

7. Verfahren nach Anspruch 6,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass bei Aufrechterhaltung des wellenlängenabhängigen Gewinns, insbesondere des mittleren Gewinns eines EDFA-Verstärkers ohne Glättungsfilter, das Formelwerk auf folgende Gleichung vereinfacht wird:

$$P_{eff}^{nach} = P_{eff}^{vor} + \frac{\bar{\lambda}_{signal}}{\lambda_{pump}} \cdot \frac{G_{sig} - 1}{G_{norm}} \cdot \{P_{sig,in}^{nach} - P_{sig,in}^{vor}\}$$

wobei das Verhältnis  $(G_{sig} = \frac{P_{sig,out}^{vor}}{P_{sig,in}^{vor}})$  nach dem Schaltvorgang annähernd konstant bleibt.

10

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass die Berechnung und die Einstellung der Pumpleistung kontinuierlich durchgeführt werden.

15

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass der neue Wert der gemessenen Pumpleistung in einem kurz gewählten Zeitintervall derart berechnet und eingestellt wird, dass während dieses Zeitintervalls jegliche wellenlängenabhängige Abweichungen des Gewinnverlaufes zu dem zuvor stabilen Gewinnverlauf minimal bleiben und  
dass nach diesem Zeitintervall eine verbleibende Abweichung des Gewinns zu dem durch die neue Pumpleistung aufrechtzuhaltenen Gewinn minimal dauert.

25

10. Verfahren nach Anspruch 9,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass nach dem Zeitintervall die verbleibende Abweichung des Gewinns zu dem durch die neue Pumpleistung aufrechtzuhaltenen Gewinn monoton als Über- oder Unterschwinger abfällt.

30

11. Verfahren nach Anspruch 10,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass bei Ausschaltung von 79 der insgesamt 80 aktiven Kanäle  
5 Gewinnabweichungen des überlebenden Kanals für unterschiedli-  
che Gewinnswerte 5, 10, 15, 20 dB maximal 0,1 dB innerhalb  
einer 1 ms betragen.
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
10 dadurch gekennzeichnet,  
dass als Pumpleistung eine Summenleistung aus mindestens ei-  
ner Pumpquelle vorgesehen ist, deren jeweilige Ausgangsleis-  
tung geregelt wird.
13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
15 dadurch gekennzeichnet,  
dass die neue Pumpleistung vorausberechnet wird.
14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
20 dadurch gekennzeichnet,  
dass neue Werte der Pumpleistung mittels einer Interpolation  
zwischen den vorausberechneten Werten der Pumpleistung einge-  
stellt werden.
15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
25 dadurch gekennzeichnet,  
dass neue Pumpleistungen mindestens einmal während einer dau-  
erhaften Änderung der Eingang- oder Ausgangsleistung errech-  
net und eingestellt werden.
16. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
30 dadurch gekennzeichnet,

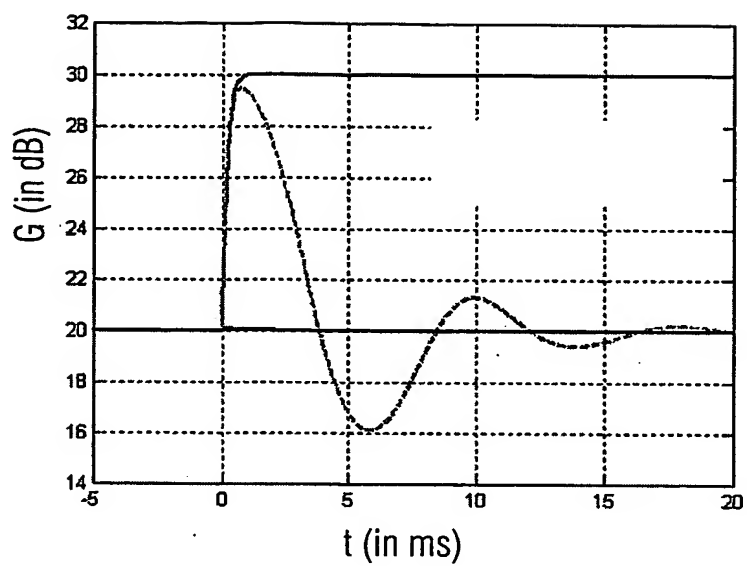
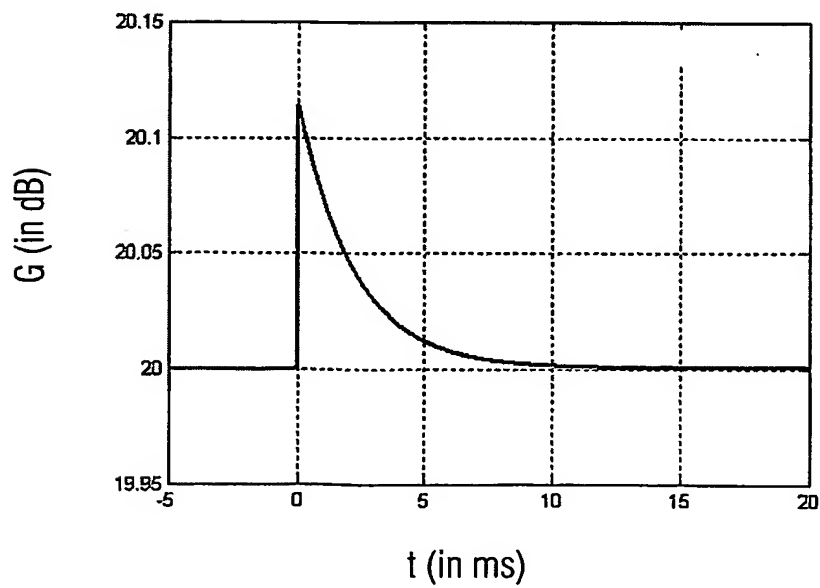
dass eine Änderung der Eingangsleistung durch eine Änderung der gesamten oder der kanalabhängigen Eingangsleistung bis zum Wegfall oder Hinzufügen mindestens eines aktiven Kanals verursacht wird.

## Zusammenfassung

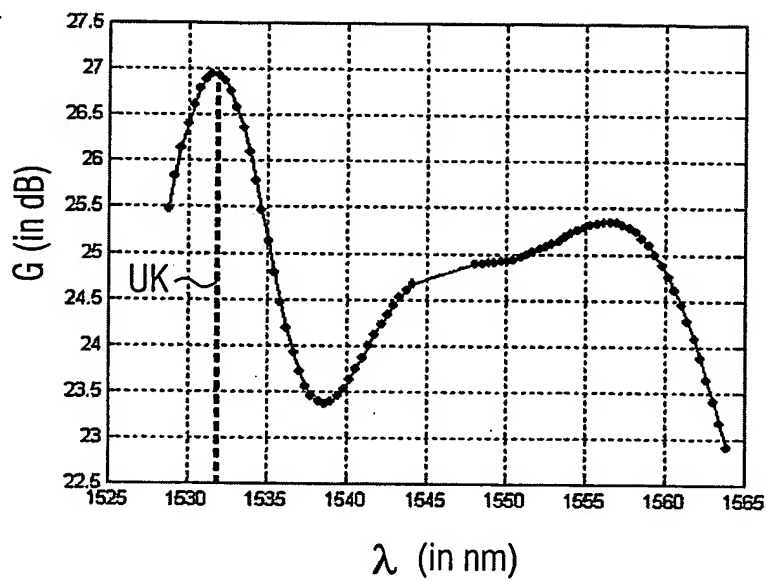
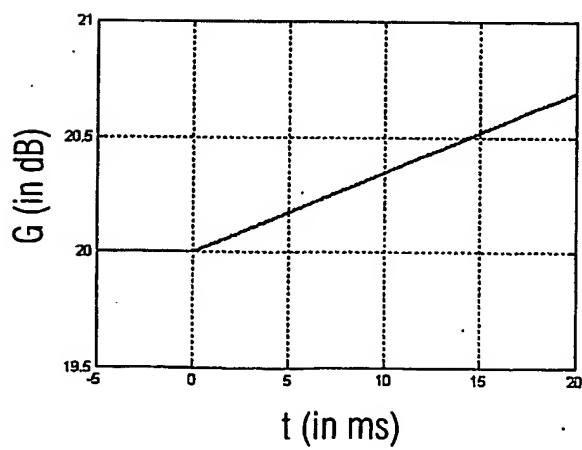
## Verfahren zur Regelung einer Pumpleistung eines optischen Verstärkers

5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Regelung einer Pump-  
leistung eines optischen Verstärkers, mit dem ein breitbandi-  
ges optisches Multiplex-Signal mit mehreren Kanälen bei einem  
Gewinnwert verstärkt wird und bei dem eine Änderung Leistung  
10 am Eingang oder Ausgang des Verstärkers detektiert wird. Nach  
der Detektion der Leistungsänderung wird ausgehend von einem  
zuvor vorliegenden stabilen Gewinnzustand des optischen Ver-  
stärkers eine neue Pumpleistung derart errechnet und einge-  
stellt, dass während eines Zeitintervalls Abweichungen des  
15 Gewinnswertes als vorgesehene zeitliche Störtransienten mini-  
mal bleiben. Dabei wird die neue Pumpleistung sehr genau und  
rasch gemäß einem Modell errechnet, das den aktuellen Gewinn-  
wert, die Wellenlängenabhängigkeit aktiver Kanäle, Alterungs-  
effekte und nicht-lineare Effekte der Verstärkung berücksich-  
20 tigt.

Fig. 2

**FIG 1****FIG 2**



**FIG 3****FIG 4**

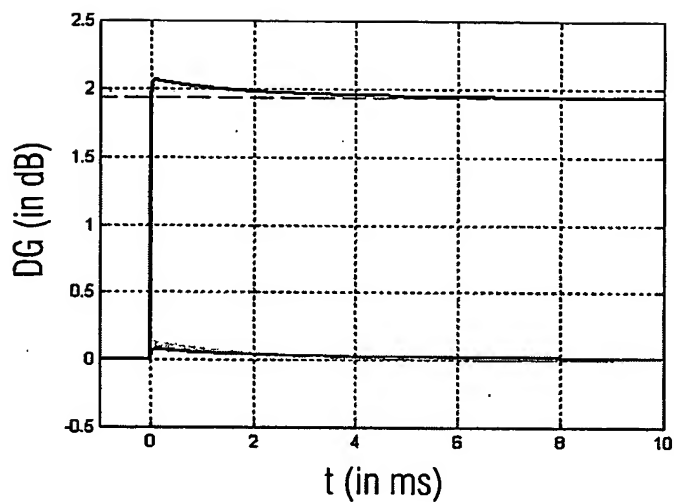
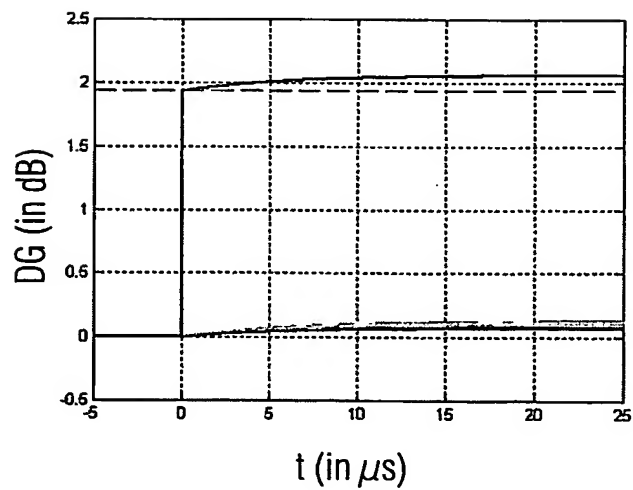
**FIG 5****FIG 6**

FIG 7

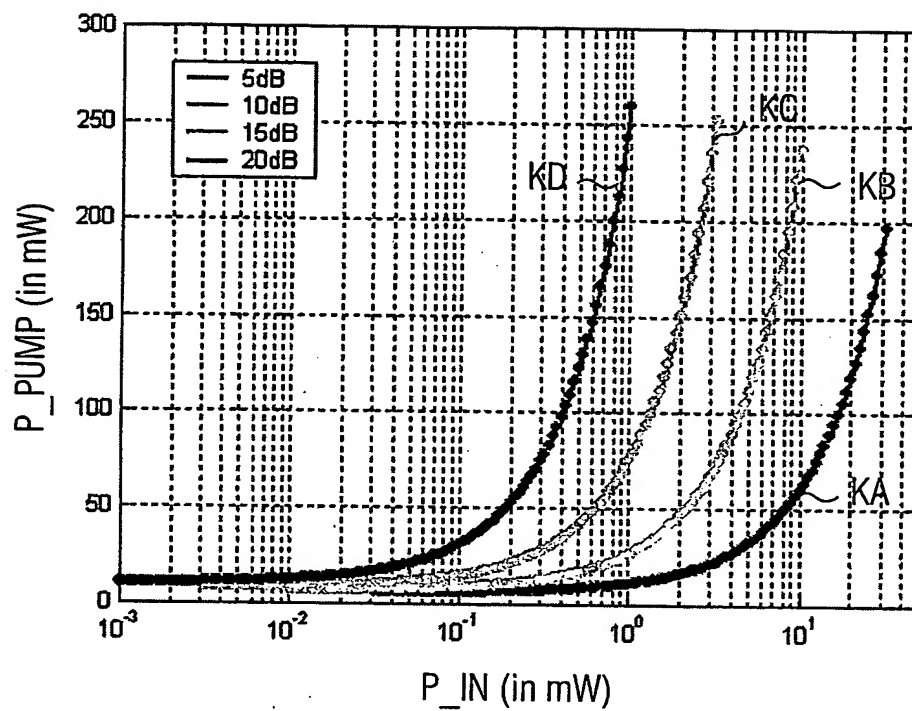


FIG 8

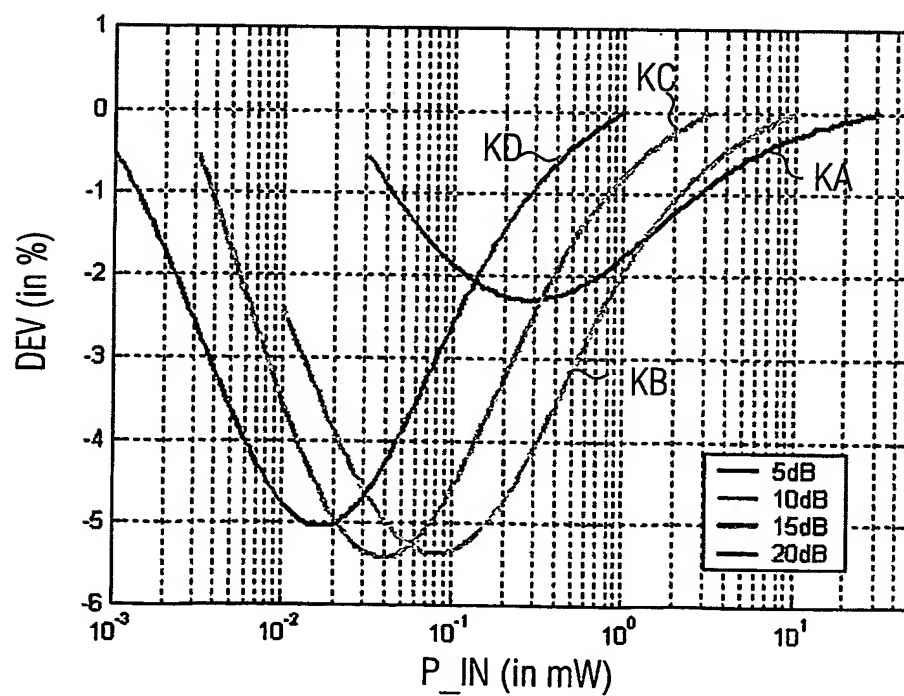


FIG 9

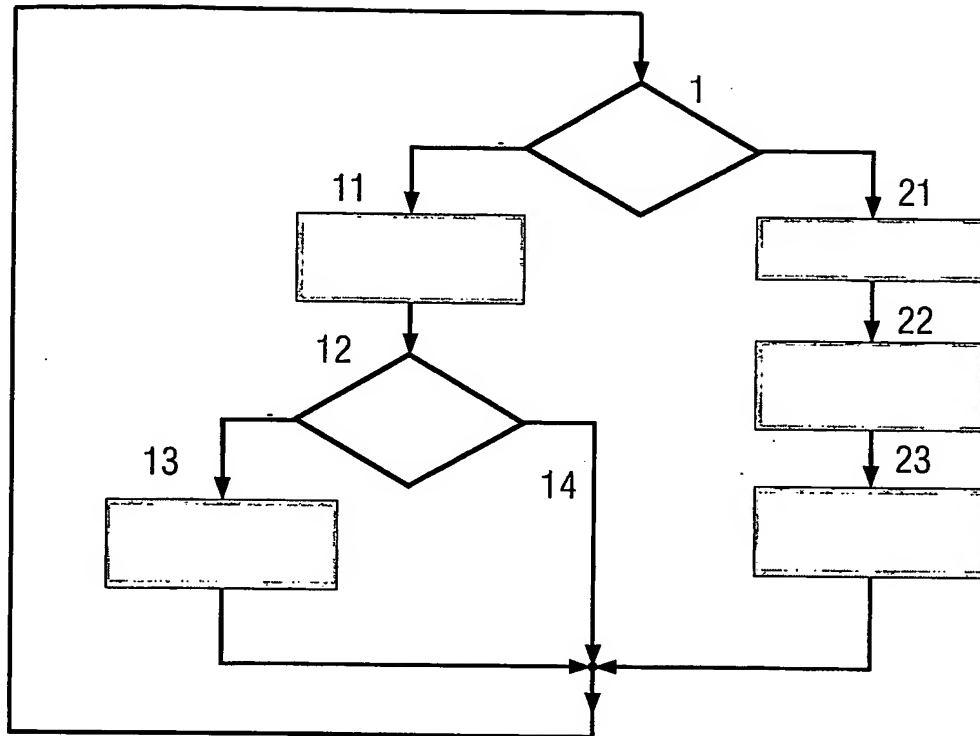


FIG 10a

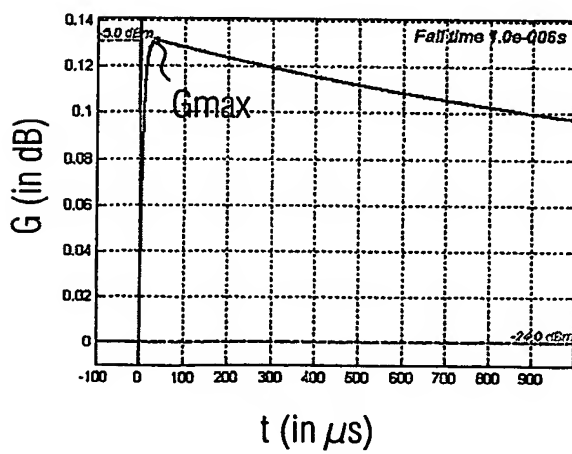


FIG 10b

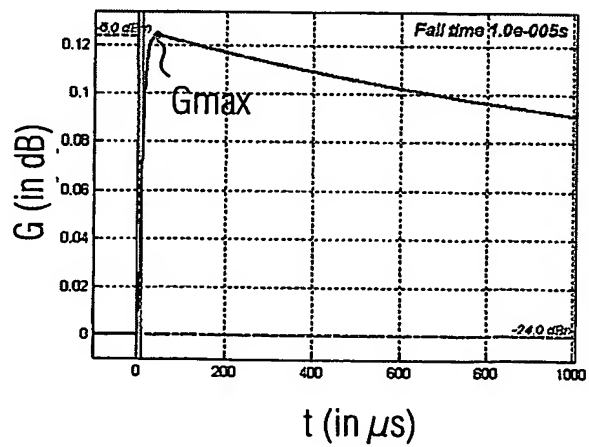


FIG 10c

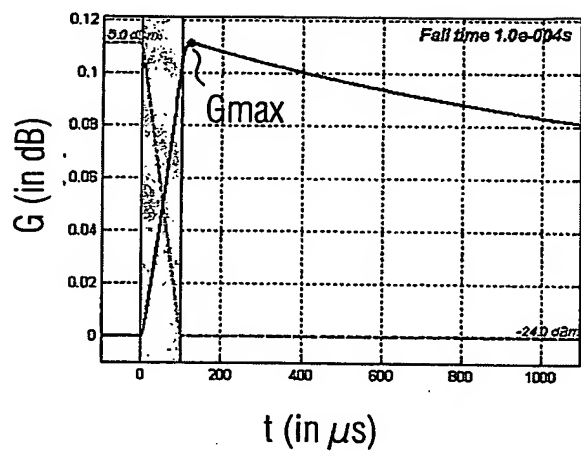


FIG 10d

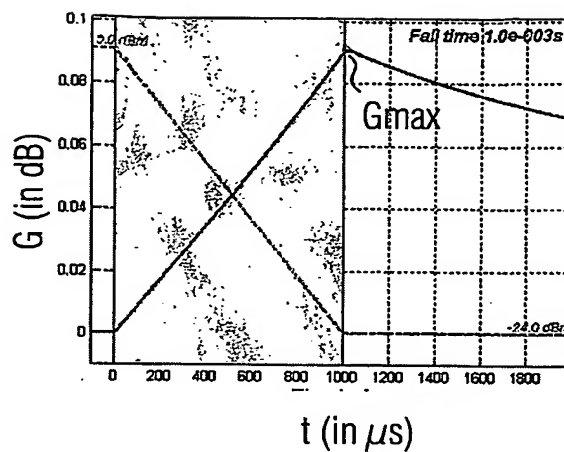


FIG 10e

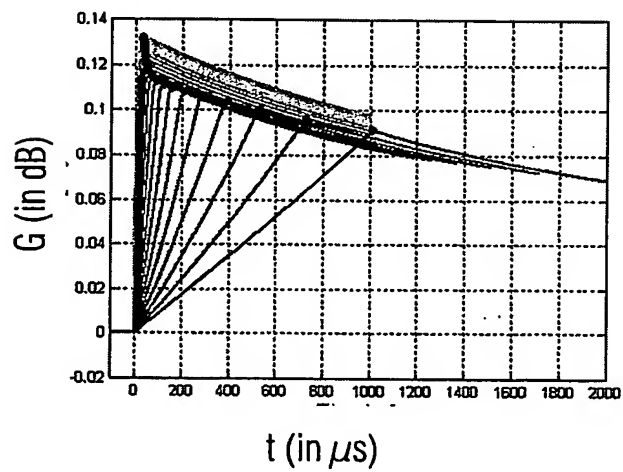


FIG 11

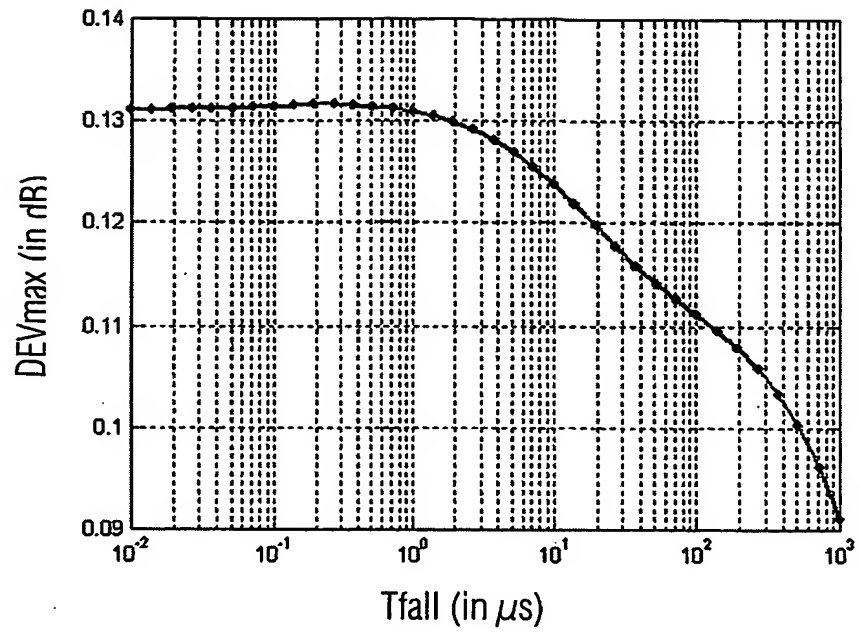
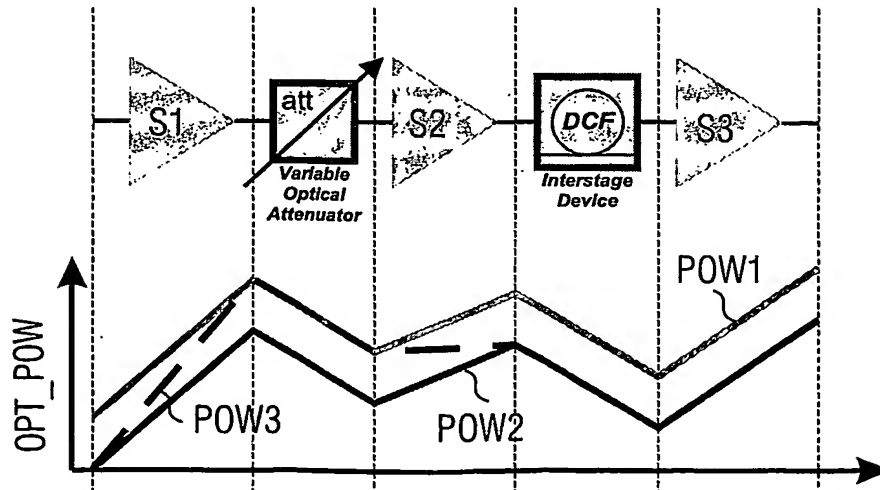


FIG 12



# Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/EP04/053511

International filing date: 15 December 2004 (15.12.2004)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: DE  
Number: 103 58 698.9  
Filing date: 15 December 2003 (15.12.2003)

Date of receipt at the International Bureau: 04 February 2005 (04.02.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland  
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning Operations and is not part of the Official Record.**

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☒ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☒ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☒ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**